



成分和非成分等时替代模型在身体活动健康效应研究中的应用比较及实证研究

黄宝莹^{1,2}, 谭健怡², 刘 晴², 张东枚², 徐华富², 黄珍惠², 程金群², 任志强², 邓凯升²,
李红娟³, 郜艳晖^{2,4*}

(1. 南方医科大学 南方医院增城分院, 广东 广州 511300; 2. 广东药科大学 公共卫生学院, 广东 广州 510315;
3. 北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084; 4. 暨南大学 基础医学与公共卫生学院, 广东 广州 510632)

摘要: 身体活动与健康促进是体育科学与公共卫生的重要研究领域。一些研究孤立地探讨了身体活动、久坐和睡眠与各种健康结局的关系,然而,在有限的24 h内,不同行为活动时间相互依赖。近年来,有学者提出采用等时替代策略,通过各活动行为时间使用的重新分配,寻找使健康收益最大化的最佳时间分配方式。梳理当前等时替代模型在身体活动研究中的发展概况,阐述传统(即非成分)等时替代模型和成分等时替代模型理论,并进行实例分析。基于此,为体育科学和公共卫生研究者提供新思路和方法,推动等时替代模型在身体活动和健康研究领域中的应用。

关键词: 身体活动;等时替代模型;成分数据

中图分类号: G804.2 **文献标识码:** A

1 身体活动不足、久坐行为和睡眠不足的健康危害

随着人们生活水平的不断提高,身体活动不足、久坐行为(sedentary behavior, SB)和睡眠不足等不良生活方式越来越普遍。截至2016年,全球年龄标准化的身体活动不足流行率达到27.5%(Guthold et al., 2018),其中女性和儿童青少年尤为严重,11~17岁学生身体活动不足率高达81.0%(Regina et al., 2020)。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)统计指出,身体活动不足是导致非传染性疾病和死亡的主要风险因素之一,亟需进行针对性干预(WHO, 2021)。2018年,WHO提出“全球身体活动行动计划”(Global Action Plan on Physical Activity),以完成2030年青少年体育活动不足相对减少15%的新目标。除身体活动不足外,全球各年龄段人群的SB和睡眠障碍等问题也呈严峻态势。国外调查显示,儿童青少年平均久坐8.6 h,占清醒时间的62%(Colley et al., 2011),成年人工作日每天久坐时间高达12 h,非工作日也不少于9 h(Madina et al., 2015)。成人睡眠时间不足(<7 h)的检出率高达64.9%(Liu et al., 2016),儿童青少年和成人均有不同程度的难以入睡、睡眠持续时间短等睡眠问题(Michael et al., 2013)。不良的生活方式与疾病息息相关。大量研究表明,身体活动不足、睡眠不足和久坐不动等不良生活方式与肥胖、心血管疾病、糖尿病及癌症等非传

性疾病的日益增多及全因死亡率升高密切相关(Brown et al., 2012; Rezende et al., 2016; Yin et al., 2017)。因此,全面系统地研究身体活动、SB和睡眠等因素与健康结局的关系具有重大的公共卫生意义。

2 等时替代研究方法在身体活动健康效应领域研究概述

2.1 传统(非成分)等时替代模型的提出

以往研究多把身体活动、SB和睡眠看作孤立的研究因素,分别来探讨这些因素与健康结局的关联。实际上,从行为学角度看,人一天的总活动时间(24 h)是恒定的,不同行为活动之间相互依赖,一种行为时间的增加或减少,必然导致其他行为总体时间降低或增加。孤立地关注某一行为活动时间的健康效应是片面的。例如,多数个体在一天之内可能同时积累大量的SB和中高强度身体活动(moderate-to-vigorous physical activity, MVPA)时间,甚至由于MVPA时间较高而出现补偿性的久坐时间过长。对

收稿日期:2020-07-27; 修订日期:2022-01-13

基金项目:国家社会科学基金重点项目(ALA190015)。

第一作者简介:黄宝莹(1993-),女,硕士,主要研究方向为身体活动与健康促进,E-mail: 784502677@qq.com。

*通信作者简介:郜艳晖(1973-),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为医疗健康数据统计方法及应用,E-mail: gao_yanhui@163.com。

这类人群来说,虽具备较高的MVPA水平,但因久坐时间过长,仍然会面临较高的健康风险。Shanahan等(2001)认为,只有从某一活动与其他活动功能关系的角度来看待投入某一活动的时间才是有充分意义的。这种认识催生了从探索孤立的单个行为所花费的时间与某些健康结果之间的关系,转变为探索日常行为之间时间的内在相互作用和重新分配与健康之间的关系。由此,学者们逐渐提出考虑身体活动、SB和睡眠时间导致身心健康综合效应的观念。Tremblay等(2007)提出人类最佳健康需要睡眠、SB和身体活动间的平衡,应将所有这些行为综合在一起考虑。此外,提出行为阶段理论的Prochaska(2008)也认为不能仅考虑单一行为(如身体活动行为)对个体健康的影响,而应该综合考虑个体的多个行为,充分探究多种行为变化对个体健康结果产生的综合效应。

2009年,Mekary等(2009)首次将等时替代模型(iso-temporal substitution model, ISM)引入身体活动的健康促进研究领域,采用ISM分析不同行为所占的时间及不同行为时间的重新分配与人体体质量变化的关系。ISM是一种基于多元回归线性模型的虚拟分析方法,其思想源于营养流行病学调查(Willett et al., 1997),用于观察不同营养素摄入与各种疾病间的关系,为了评估特定营养素的作用,在相互替代时需控制总能量摄入恒定。与总能量摄入类似,人的一天只有恒定的24 h,其中活动时间包括各强度身体活动、SB和睡眠,一种行为时间的变化必然导致剩余行为总体时间改变。与饱和脂肪对冠心病的辩证影响(用饱和脂肪替代反式脂肪有益,用饱和脂肪替代不饱和脂肪有害)类似,不同行为活动给人体健康带来的影响不仅取决于特定活动,还取决于它所取代的活动。例如,30 min MVPA替代30 min SB和替代30 min的睡眠,导致的身体质量指数(body mass index, BMI)变化并不相同。先前的流行病学研究大多数孤立地分析了每种行为之间的联系,没有考虑到其他共同依赖行为的转移。MVPA通常只占一天时间的5%左右,而剩余约95%的低强度身体活动(light-intensity physical activity, LPA)、SB和睡眠等多种行为间也相互作用并对健康产生重要影响。目前,越来越多的研究表明LPA与很多健康益处相关(Fuzeki et al., 2017),过短或过长睡眠时间均与死亡率增加相关(Yin et al., 2017)。因而,对个人身心健康发展而言,探究如何科学合理分配24 h行为活动连续谱的各部分时间更具应用价值。利用ISM,可从群体角度量化24 h各行为时间使用相互替代所导致的健康收益,精准定位使健康效益最大化的24 h行为活动连续谱时间分配平衡点,为公共卫生政策制定提供极具价值的量化依据。

2.2 传统ISM原理

传统ISM以多元线性回归分析为基础。本实例目的为探究身体活动(包括MVPA和LPA)、SB和睡眠之间时

间重新分配对成人BMI的影响。用 t_{MVPA} 、 t_{LPA} 、 t_{SB} 、 t_{SLEEP} 、 t_{TOTAL} 分别表示MVPA、LPA、SB、睡眠和总活动时间,假设研究者关注MVPA、LPA和睡眠替代SB产生的效应,则替代模型如下:

$$BMI估计值 = b_1 \times t_{MVPA} + b_2 \times t_{LPA} + b_3 \times t_{SLEEP} + b_4 \times t_{TOTAL} + b_5 \times 协变量 \quad (1)$$

模型(1)中未放入SB时间, $b_1 \sim b_5$ 分别表示用其中一种活动行为替代未放入活动行为的效应,即分别表示用MVPA、LPA和睡眠替代SB所产生的理论效应。其中, $t_{TOTAL} = t_{MVPA} + t_{LPA} + t_{SLEEP} + t_{SB}$,对于每个个体而言, t_{TOTAL} 是个常数(等时性),取值 $\leq 24 \text{ h}(1440 \text{ min})$ 。同理,模型中把 t_{MVPA} 换成 t_{SB} ,则可观察到其他行为替代MVPA产生的效应。同时,模型允许调整其他混淆变量。例如,若想得到10 min的替代效果,则总活动的每个组成部分在进入模型前除以常数10。此外,还可根据研究目的,将各行为分解成子行为,如把久坐行为细分成视屏和非视屏时间等。

2.3 成分ISM的提出及改进

与传统的非成分ISM使用各行为时间的绝对量不同,Pedišić(2014)将传统ISM加以发展,提出活动-平衡模型(activity balance model)(图1),并随后提出时间使用流行病学的概念及研究(framework for viable integrative research in time-use epidemiology, VIRTUE)框架(Pedišić et al., 2017),这一框架也逐渐被国内学者关注。

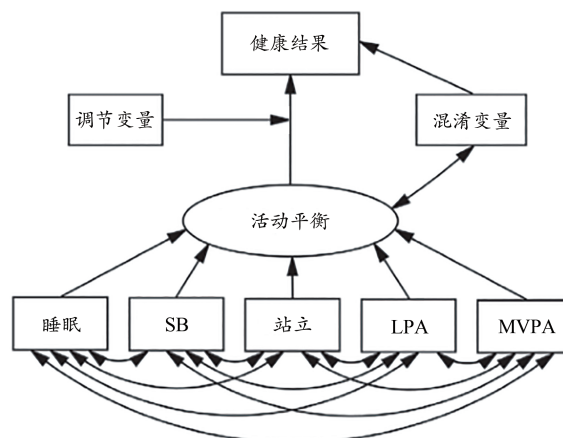


图1 活动平衡模型(Pedišić, 2014)

Figure 1. Activity Balance Model(Pedišić, 2014)

活动-平衡模型是研究睡眠、SB、站立时间、LPA和MVPA时间与健康结局之间关系的一个理论框架。该模型认为每天的时间限制为24 h,因此,各行为时间使用数据传达的是相对信息而不是绝对信息,也就是说,时间数据实际上属于成分数据,使用时间的绝对量进行ISM分析会导致多重共线性问题,以各行为活动为自变量时应首选成分数据分析方法(compositional data analysis, CoDA),将各行为时间使用作为一个结构性整体来研究。Chastin等(2015)提出在成分数据框架下进行ISM分析的思路,先

对各行为活动的时间数据进行等距对数比(isometric log ratio, ilr)转换,然后用转换后的时间数据拟合线性回归模型,接着对模型各系数进行ilr逆转换,得到各成分与结局变量在单形空间拟合的回归系数,并据此计算变化预测矩阵,最后根据变化预测矩阵计算时间重新分配后产生的效应,以便解释响应变量的变化。这样不仅解决多重共线性,又可从整体角度分析所有行为时间变量的综合影响。然而,变化预测矩阵的计算仍有不足。该矩阵中的每一项由一对成分系数的对数比乘以常数 $1/(2D)^2$ 计算得出(D 为时间数据中的成分个数),即每个条目仅从2个成分系数计算得到,没有考虑其余的成分系数。然而2个成分之间的比率不可避免地会改变自身与其他成分之间的比率,只关注2个成分系数的算法会导致预测结果的不准确。

因此,Dumuid等(2018b)在研究身体活动、SB和睡眠时间对学龄儿童肥胖的影响时提出了新的成分ISM分析方法。他认为,由于成分数据只携带相对信息,重新分配原始时间(如10 min)的概念是虚拟的。然而,每天的时间使用成分是闭合的,可通过线性调整使各成分的总和为有意义的总量(如24 h,即1 440 min)。一旦时间使用成分调整成总和1 440 min,每个时间成分的值代表该成分花费的分钟。同样地,如果时间使用构成用比例来表示,则重新分配的时间也可以用比例来表示。因此,可以考虑将原始时间从一部分重新分配到另一部分。然而,这仅可用各成分的几何均值作为起始成分,用时间重新分配后的各时间成分的预测值减去起始成分的预测值来代表其中2种行为活动时间重新分配后产生的效应大小。此计算方法利用了各时间成分的完整ilr坐标集进行预测,弥补了变化预测矩阵忽略剩余2个成分的信息所导致的预测结果有误,可更全面、准确地估计时间重新分配后对健康结果的影响。

2.4 成分ISM原理

2.4.1 时间数据的成分属性

成分数据为非负多元数据,和为常数,通常指观测对象关于某个指标多个不同部分的观测值在总量中的比值数据,所有比值总和为1(定和限制)。时间使用数据本质上是一种具有特殊内在特征的多元成分数据,表现为各成分值非负,只在有限区域内分布且分量总和恒定,即满足“定和约束”。根据研究目的,一天的行为活动可由各种子行为的组合方式组成,但无论何种组合方式,总时间恒定为24 h。例如,一天中的24 h由MVPA、LPA、SB、睡眠这4个部分组成,满足以下公式:

$$t_{\text{SLEEP}} + t_{\text{SB}} + t_{\text{LPA}} + t_{\text{MVPA}} = 24 \text{ h} \quad (2)$$

在相应地缩放各时间使用成分的前提下,一天时间的总和还可以表示为1 440 min,100%或1。这种尺度缩放性和扰动不变性是CoDA的基本原则之一,即无论使用何种尺度,分析结果都是相同的。因为每个人的总时间相同,成分数据关注各行为活动时间占总时间的比例所提

供的相对量信息,而单位变换后某行为的时间绝对量和总时间的绝对量不影响分析结果。

2.4.2 成分数据统计描述

成分数据的样本空间属于标准的单形空间,一般用于传统欧式空间的描述统计量(如算术平均数和标准差等)不符合成分数据的几何形状。在单形空间中,成分数据的集中趋势统计量为其各成分的几何均数。由于单个成分的方差不包含成分间相互依赖的任何信息,而一个成分的变化必然引起其他成分变化,成分数据的离散趋势用变异矩阵来描述,其中变异矩阵元素越接近0,相应2个成分对数比方差越小,成分间比例共同依赖性越强(Boogaart et al., 2013)。

2.4.3 ilr转换

目前,CoDA主要有2种:1)基于成分间的对数比变换,即通过原始变量的对数比变换将单形空间映射到标准欧式空间,再用传统的多变量统计方法分析,包括非对称对数比转换、中心对数比转换和ilr转换;2)可基于单形空间中的适当分布直接对CoDA建模,该分布要满足有界域,如Dirichlet分布。其中,Egozcue等(2003)提出的ilr转换方法目前在CoDA中应用最为广泛。ilr通过构建标准正交基进行转换,以使CoDA从单形空间映射到欧式空间,消除CoDA的定和限制,同时保持转换前后向量的加法、数乘、内积运算结果不变,实现了单形空间到欧式空间的等价变换。根据参考的正交基,可以构造不同类型的ilr坐标(Boogaart et al., 2013),ilr坐标可与非成分协变量(如性别、年龄等)一起纳入统计模型。通过顺序二进制分区(sequential binary partition, SBP)构建的ilr坐标广泛应用于时间流行病学的成分多元方差分析、成分判别分析和成分聚类分析等研究中(Dumuid et al., 2017; Filzmoser et al., 2012)。如果需要可解释的ilr坐标,SBP可基于专业知识并针对特定的研究目的进行构建。然而,对于成分ISM来说,任何SBP均适用,以将感兴趣的成分放在第1位的标准正交基为例。假设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in S^D$,为D元成分数据,ilr转换公式如下(Egozcue et al., 2003):

$$ilr = \sqrt{\frac{1}{(D-i)(D-i+1)}} \times \left(\ln \frac{x_i}{x_{i+1}} + \ln \frac{x_i}{x_{i+2}} + \dots + \ln \frac{x_i}{x_D} \right) \quad (3)$$

式中, x_k 为第 k 个成分; $k = i + 1, i + 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, D - 1$ 。经上式转换,D元数据由 $D - 1$ 个ilr坐标表示,第1个ilr坐标由放置在成分数据第1位的成分 x_1 与剩余成分的几何均值的对数比计算得出。这样,关于第一成分 x_1 在时间使用分布中的相对重要性(相对于剩余成分)的所有信息都包含在第1个ilr坐标中。因此,通过依次重新排列各成分位置,让每一成分都放置首位1次,得到D个排列方式,可分别获取各成分的所有信息。

2.4.4 成分ISM

假设24h分解成D元成分数据 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in S^D$, 采用ilr转换[式(3)]后,建立结局变量y的多元线性回归模型(Dumuid et al., 2019b):

$$y_{(z_1, \dots, z_D)} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{D-1} \beta_i z_i + \varepsilon \quad (4)$$

式中,y为因变量; $z_i = \sqrt{\frac{D-i}{D-i+1}} \ln \left(\frac{x_i}{\sqrt{\prod_{k=i+1}^D x_k}} \right)$; $i = 1, 2, \dots, D-1$; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{D-1}$ 为回归系数; ε 为随机误差项。回归系数 β_1 解释为与除第一成分外的其他成分相比,第一成分所花时间与y的关联强度。

前已述及,成分数据 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D)$ 中各成分集中趋势统计量的描述应采用几何均值,如第i成分的几何均值 $g_i (i=1, 2, \dots, D)$ 表示为:

$$g_i = \sqrt[n]{x_{i1} x_{i2} x_{i3} x_{i4} \dots x_{in}} \quad (5)$$

式中,n为第i成分的总观测值个数, x_{i1} 表示第i成分的第1个观测值。将几何均值向量 $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_D)$ 代入式(3),经ilr转换后得到向量 $\mathbf{z} = (z_{g_1}, z_{g_2}, \dots, z_{g_{D-1}})$,代入回归模型(4)可得到群体水平的预测值 $y_{(z_{g_1}, z_{g_2}, \dots, z_{g_{D-1}})}$ 。

考虑各行为活动时间的替代效应时,假设从成分 x_j 重新分配时间比例 Δt 到成分 $x_i, i \neq j \in (1, 2, \dots, D)$,如将成分 x_j 分配 $t=10 \text{ min}$ 给成分 x_i ,则 $\Delta t=10/1440$,且 $0 < t < x_j$,分配后第j个成分和第i个成分的时间如下:

$$g'_j = g_j - \Delta t \quad (6)$$

$$g'_i = g_i + \Delta t \quad (7)$$

式中, g_j, g_i 分别为第j、i个成分 x_j, x_i 的几何均值。假设其他成分的时间(各成分的几何均值)保持不变,把虚拟的成分数据 $\mathbf{g} = (g_1, g'_j, \dots, g'_i, g_D) \in S^D$ 代入式(3)进行ilr转换后,得到 $\mathbf{z} = (z_{g_1}, z'_{g_j}, \dots, z'_{g_i}, \dots, z_{g_{D-1}})$,再将其代入回归模型式(4)后,得到 $y'_{(z_{g_1}, z'_{g_j}, \dots, z'_{g_i}, \dots, z_{g_{D-1}})}$ 。则第j个成分分配 Δt 时间到第i个成分后结局变量y的平均变化量 Δy 如下:

$$\Delta y = y'_{(z_{g_1}, z'_{g_j}, \dots, z'_{g_i}, \dots, z_{g_{D-1}})} - y_{(z_{g_1}, z_{g_2}, \dots, z_{g_{D-1}})} = (\beta_0 + \sum_{i=1}^{D-1} \beta_i z'_i + \varepsilon) - (\beta_0 + \sum_{i=1}^{D-1} \beta_i z_i + \varepsilon) = \sum_{i=1}^{D-1} \beta_i (z'_i - z_i) = \sum_{i=1}^{D-1} \beta_i \Delta z_i \quad (8)$$

以各行为活动时间数据为例,考虑其他行为替代睡眠的作用时,可将 t_{SLEEP} 作为第一成分,根据式(3)经ilr转换后,得到:

$$\begin{aligned} z_1 &= \sqrt{\frac{3}{4}} \ln \frac{t_{\text{SLEEP}}}{\sqrt[3]{t_{\text{SB}} \times t_{\text{LPA}} \times t_{\text{MVPA}}}} \\ z_2 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \ln \frac{t_{\text{SB}}}{\sqrt[2]{t_{\text{LPA}} \times t_{\text{MVPA}}}} \\ z_3 &= \sqrt{\frac{1}{2}} \ln \frac{t_{\text{LPA}}}{\sqrt[1]{t_{\text{MVPA}}}} \end{aligned} \quad (9)$$

将ilr转换后的 z_1, z_2 和 z_3 作为多元线性回归模型[式(4)]中的解释变量,以预测结局y,则ilr变换后的线性预测模型如下:

$$y = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \varepsilon \quad (10)$$

获得线性模型后,可以作各行为活动时间的虚拟替换。先计算各行为活动成分的几何均值向量 \mathbf{g} ,以 $\mathbf{g} = (g_{t_{\text{SLEEP}}}, g_{t_{\text{SB}}}, g_{t_{\text{LPA}}}, g_{t_{\text{MVPA}}})$ 作为起始成分,然后构造替换后的几何均值向量 \mathbf{g}' 。例如,用 $t \text{ min}$ 的MVPA替代睡眠,则 $\mathbf{g}' = (g_{t_{\text{SLEEP}}} - \Delta t, g_{t_{\text{SB}}}, g_{t_{\text{LPA}}}, g_{t_{\text{MVPA}}} + \Delta t)$ 。把起始成分和替换后成分均转化成ilr坐标,起始成分的ilr坐标表示为 \mathbf{z}^* ,替换后成分的ilr坐标表示为 \mathbf{z}' , Δz_k 表示替换前后坐标间线性组合的差异,即 $\Delta z_1 = z'_1 - z_1^*$, $\Delta z_2 = z'_2 - z_2^*$, $\Delta z_3 = z'_3 - z_3^*$,把 $\Delta z_1, \Delta z_2$ 和 Δz_3 代入式(10)。替换前后线性模型的截距项和随机误差项不变,故截距项和随机误差项均被抵消,得到用 $t \text{ min}$ 的MVPA替代睡眠导致群体水平上y的平均变化量:

$$\Delta y = \beta_1 \Delta z_1 + \beta_2 \Delta z_2 + \beta_3 \Delta z_3 \quad (11)$$

同理,上述方法也可用于个体水平上的虚拟预测。

2.5 传统和成分ISM的应用进展

目前,24h时间使用流行病学框架已在国际研究中广泛接受。根据24h活动行为时间使用研究,Tremblay等(2016)发布了加拿大儿童和青少年的24h行为活动指南。随后,澳大利亚、新西兰、南非、芬兰、克罗地亚和WHO也先后发布了24h活动指南。与此同时,ISM这一研究策略也在身体活动健康促进研究领域被广泛采纳。回顾近年迅速增多的相关文献,ISM主要应用于研究各类人群24h行为活动连续谱对体成分、体质健康、心肺健康、抑郁症状、生活质量和全因死亡等多种健康结局的影响。例如,Leppänen等(2017)采用传统ISM分析SB、LPA和MVPA对学龄前儿童体成分和体质健康的影响,发现MVPA参与时间与12个月后去脂体质量和身体素质显著相关;Oviedo-Caro等(2020)使用成分ISM分析发现增加MVPA时间对维持怀孕中期妇女的心肺健康至关重要;Cruz等(2020)使用成分ISM发现SB与老年人抑郁症状相关;Rosen等(2020)在一项长达15年的队列研究中运用成分ISM发现增加MVPA时间可降低心血管疾病和全因死亡的风险。然而,目前仅有Biddle等(2018)和Dumuid等(2018a)的应用研究中比较了传统ISM和成分ISM这2种方法的结果差异。

通过在PubMed检索2009年1月—2020年11月身体活动促进健康领域中采用传统ISM、成分ISM和CoDA进行分析的论文,检索词分别为“Isotemporal Substitution”和“Compositional data”and (“Physical activity” OR “Sedentary” OR “Sleep”)。检索结果表明,从论文总量上看,采用CoDA的论文已达97篇,且逐年增加,可见CoDA在身体活动促进健康领域应用愈发广泛。此外,采用传统ISM的

论文(124篇)较采用成分ISM的更多(50篇),但从2018年开始,采用成分ISM的论文数量迅速上升,并在2020年11月超越了传统ISM(图2)。

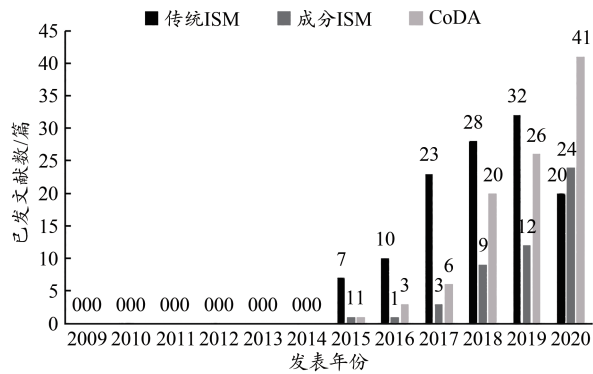


图2 采用传统ISM、成分ISM和CoDA的论文统计
Figure 2. Statistics of Published Articles Using Traditional ISM, Compositional ISM and CoDA

3 实例分析

3.1 数据来源

实例分析数据来自美国全国健康和营养调查(National Health and Nutrition Examination Survey, NHANES),这是一项采用多阶段分层整群随机抽样的横断面研究,由美国健康与人类服务部、疾病控制与预防中心和国家卫生统计中心共同开展,每2年进行1次。由于NHANES仅在2005—2006年使用加速度计收集身体活动数据,其余年份通过问卷调查收集,故选2005—2006的客观数据进行身体活动实例分析。

3.2 研究对象

从2005—2006年参与NHANES调查的10 348名美国居民中选取年龄≥20岁的成年人,排除MVPA、LPA、SB、睡眠和BMI其中1项缺失的个体,最终纳入3 088人。

3.3 变量定义

3.3.1 自变量和结局变量

本研究的自变量为平均每天MVPA、LPA、SB和睡眠的使用时间。其中MVPA、LPA和SB的使用时间由ActiGraph AM-7164加速度计获得。参与者被要求连续7天在腰部佩戴加速度计(睡觉或洗澡时除外)。加速度计以每分钟的活动计数来记录身体活动的强度。非佩戴时间定义为至少连续60 min零计数的时间段(McGregor et al., 2021)。一天至少佩戴10 h加速度计为有效天,一周的有效天数至少为4天(Frith et al., 2018)。每分钟计数阈值<100 min归类为SB,100~2 020 min为LPA,>2 020 min为MVPA。计算SB、LPA和MVPA在有效天数内的总时间后,换算为有效天内平均每天SB、LPA和MVPA时间。根据问卷问题“你通常每晚实际睡眠多少小时?”确定睡眠用时。用24 h减去睡眠用时,剩余时间按SB、LPA和MVPA间的比例进行线性调整。结局变量BMI根据体质量/kg除以身

高/m的平方确定。

3.3.2 协变量

人口特征变量包括性别和年龄。其他行为变量(如吸烟和饮酒)均由研究对象自我报告获得。其中根据问题“您一生中至少抽过100支烟?”“您现在抽烟吗?”分为从不吸烟、以前吸烟和现在吸烟;终生饮酒<12杯定义为不饮酒,终生饮酒≥12杯但过去一年没有饮酒定义为过去饮酒,每周饮酒≤14杯的男性和每周饮酒≤7杯的女性定义为适量饮酒,每周饮酒>14杯的男性和每周饮酒>7杯的女性定义为过量饮酒(Taylor et al., 2016)。

3.3.3 统计分析

应用传统ISM和成分ISM探究MVPA、LPA、SB和睡眠之间重新分配15 min对BMI的影响,并分别在MVPA和SB、LPA和睡眠之间重新分配一系列时间(以10 min为增量,从10 min至60 min),对整个时间再分配过程中BMI的估计值变化进行了解说明。其中,成分ISM分析采用R软件中的包compositions和robCompositions完成。

3.4 结果

3.4.1 研究对象的基本特征及24 h活动行为情况

研究对象的平均年龄为(50.37±18.26)岁;BMI均值为(28.67±6.31)kg/m²。其他基本情况见表1。研究对象平均每日睡眠、SB、LPA和MVPA时间的算术均值和几何均值以及24 h内的百分比见表2。

表1 研究对象的基本特征
Table 1 Basic Characteristics of the Subjects

变量	类别	n	百分比/%
性别	男	1 521	49.26
	女	1 567	50.74
饮酒情况	不饮酒	391	13.48
	过去饮酒	854	29.44
	适量饮酒	1 275	43.95
	过量饮酒	381	13.13
吸烟情况	从不吸烟	1 633	52.80
	以前吸烟	858	27.78
	现在吸烟	597	19.33

表2 研究对象24 h活动行为情况
Table 2 The 24 h Activity Behavior of the Subjects

变量	算术均值/h	百分比/%	几何均值/h	百分比/%
睡眠	6.75±2.07	28.14	7.00	29.17
SB	9.85±2.31	41.06	9.99	41.63
LPA	6.87±1.40	28.63	6.69	27.88
MVPA	0.52±0.53	2.17	0.32	1.33

3.4.2 各行为活动时间使用间的依赖性关系

24 h行为活动四成分的成分对数比方差见表3。其

中,成分间的共同依赖性大小为睡眠和SB最大,MVPA和睡眠次之,而MVPA和SB最小。

表3 研究对象24 h行为活动成分对数比的变异矩阵

Table 3 Variation Matrix of the Log Ratio of the 24 h Behavioral Activity Components of the Subjects

24 h行为活动	睡眠	SB	LPA	MVPA
睡眠	0.000 0	0.150 3	0.206 9	1.460 1
SB	0.150 3	0.000 0	0.306 3	1.725 4
LPA	0.206 9	0.306 3	0.000 0	1.126 1
MVPA	1.460 1	1.725 4	1.126 1	0.000 0

3.4.3 成分和传统ISM的实证比较

如表4所示,除LPA和SB之间的重新分配,其他成分之间重新分配15 min对BMI的影响均有统计学意义。传统ISM和成分ISM结果一致显示用15 min的MVPA分别替代睡眠、SB和LPA能够显著降低BMI。此外,传统ISM和成分ISM结果均表明,涉及MVPA的重新分配结果与较高的BMI估计值变化量有关,除与MVPA自身效应有关外,还可能与MVPA在时间使用构成中所占的比例相对

较小(几何均值为19.2 min/d)有关,MVPA 15 min的变化代表了接近50%的变化。相比之下,睡眠15 min的变化仅代表了3.5%的变化。如图3所示,传统ISM和成分ISM结果均显示,随着重新分配时间增加,BMI估计值变化量的绝对值增加。

综合表4和图3,可看出2种方法的分析结果存在以下差异:1)相同两成分间重新分配15 min,传统ISM和成分ISM的BMI估计值变化量不等,由表4可知,有统计学意义的BMI估计值之中,传统ISM与成分ISM对应结果的相对差异为4%~61%(计算方式为传统ISM和成分ISM估计值间的绝对差异除以2个模型的汇总估计值),传统ISM和成分ISM结果的较大差异似乎与较高BMI估计值有关;2)成分ISM结果显示,2个活动成分之间重新分配后对BMI的估计值的改变是非对称的,例如,15 min的SB替代MVPA,BMI预期增加1.76,但15 min的MVPA替代SB,BMI预期减少0.68,而传统ISM结果是对称的;3)成分ISM中BMI的估计值差异与重新分配时间量不成线性比例,但传统ISM显示重新分配时间和BMI的变化量呈线性关系。

表4 MVPA、LPA、SB和睡眠之间重新分配15 min对BMI的影响

Table 4 The Effect of 15 min Reallocation between MVPA, LPA, SB, SLEEP on BMI

△BMI(95% CI)

方法	替代变量	原始变量			
		睡眠	SB	LPA	MVPA
传统ISM	睡眠		-0.12(-0.16,-0.07)*	-0.11(-0.16,-0.07)*	0.40(0.27,0.52)*
	SB	0.12(0.07,0.16)*		0.00(-0.03,0.03)	0.51(0.39,0.63)*
	LPA	0.11(0.07,0.16)*	0.00(-0.03,0.03)		0.51(0.38,0.64)*
	MVPA	-0.40(-0.52,-0.27)*	-0.51(-0.63,-0.39)*	-0.51(-0.64,-0.38)*	
成分ISM	睡眠		-0.10(-0.14,-0.06)*	-0.12(-0.16,-0.08)*	1.66(1.07,2.06)*
	SB	0.10(0.06,0.14)*		-0.02(-0.05,0.01)	1.76(1.37,2.15)*
	LPA	0.12(0.08,0.16)*	0.02(-0.01,0.05)		1.78(1.38,2.19)*
	MVPA	-0.58(-0.73,-0.43)*	-0.68(-0.82,-0.53)*	-0.70(-0.86,-0.54)*	

注:上表为用15 min列中的行为替代行中的行为所引起的BMI估计值变化(如第一列的0.12表示用15 min的SB替代睡眠引起BMI估计值的变化量);*表示P<0.05;协变量为年龄、性别、吸烟、饮酒。

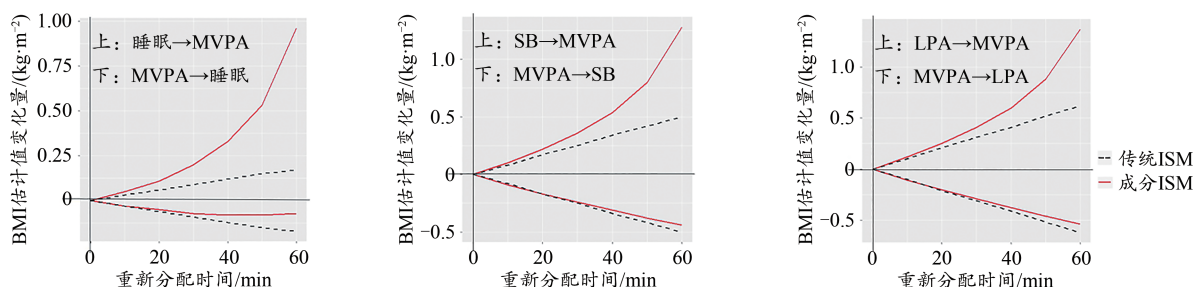


图3 MVPA分别和睡眠、SB和LPA重新分配时间引起的BMI估计值变化

Figure 3. Changes in BMI Estimates Caused by Reallocation between MVPA and SLEEP, SB, LPA

4 讨论

目前,很多学者已经意识到时间数据的成分属性,但对于传统ISM和成分ISM在身体活动研究领域的优劣比

较暂未达成共识。传统ISM的开发者团队坚持认为传统ISM才是适合分析身体活动的模型,成分ISM只是另一种等价形式(Mekary et al., 2019)。传统ISM的优点在于

计算更为直观、便于理解,且在建立体育活动指导方案时可以给出统一的时间标准。然而,传统ISM也确有局限性。首先,24 h活动行为的时间数据,本质上是成分数据,属于标准的单形空间,传统ISM把时间视为欧式空间中的无约束向量,忽视了时间数据的成分属性,无法避免多重共线性问题。其次,传统ISM只要求关注变量在一天中的分配情况及与健康结局的关系,但一天中任何一个行为时间的改变必然会导致另一个或多个其他行为时间的相应改变,如身体活动时间增多必须以久坐或睡眠时间减少为代价。虽然增加身体活动时间对人体健康是有益的,但相应减少的久坐或睡眠时间也会对健康产生有益或有害的影响,故传统ISM对一天中24 h各种具体行为活动的时间分配所产生的综合健康效应尚不明确。最后,传统ISM忽视了各行为活动的起始时间,结局变化只与重新分配的时间相关,也就是说,MVPA的起始成分是30 min/d或150 min/d等都与结局变化无关。所以,传统ISM无法根据不同的日常时间使用成分与结局的相关性或行为活动的增加或减少去检测相关性中的不对称性,也无法识别到维持行为活动的重要性,以及对起始活动成分不同的人(如活跃的儿童和久坐儿童)而言行为改变是否与结局存在关联。但这些信息对于公共卫生干预策略制定是极具价值的。相比之下,成分ISM的结局预测值考虑了起始成分,更符合时间的相对性质。事实上,成分ISM利用ilr坐标表示时间数据,可解决多重共线性这一统计问题,并提供了更为精准的不同行为活动间重新分配后产生的效果。同时,越来越多的学者把成分ISM应用在身体活动的健康促进领域。诚然,成分ISM也存在不足。首先,ilr转换中不能包含0。目前常用的解决方法是用合理的小数值替换0或只分析非零子集等。其次,成分ISM也是基于线性模型,可能会对模型拟合造成限制。如Pérez-Foguet等(2017)提出,未来应用更灵活的、能够检测非线性关系的建模方法来扩展ISM的范围。

本研究将传统ISM和成分ISM运用于分析美国成人MVPA、LPA、SB和睡眠之间重新分配15 min对BMI的影响。传统ISM和成分ISM结果一致显示,MVPA是行为活动成分中最重要行为,MVPA替代其他行为与BMI的降低量有关,这与以往以成人(Biddle et al., 2018)、老年人(Dumuid et al., 2018a)和青少年(Dumuid et al., 2019b)为研究对象的ISM研究结果一致。此外,成分ISM的不对称结果表明,减少MVPA时间对BMI增加的效应大于增加等量MVPA时间对BMI降低的效应。例如,用15 min SB替代MVPA引起BMI估计值增加量(1.76)比用15 min MVPA替代SB引起BMI预测值降低量(0.68)多,提示减少高于平均水平的不利行为(如SB)的收益比增加有益行为(如MVPA)更大。然而,当睡眠和SB被LPA替代时,没有观察到降低BMI的有利结果。这与一项澳大利亚的成人横

断面研究(Mekary et al., 2019)以及一项青年体力活动和健康指标的系统综述(Dumuid et al., 2018b)结论一致。然而,一项关于西班牙孕妇的横断面研究结果却显示LPA替代睡眠和SB可降低BMI(Oviedo-Caro et al., 2020)。可见,LPA和肥胖的关系是混合的。有学者认为,是加速度计中LPA切点的差异导致了这些不一致的结果(Poitras et al., 2016)。综上,研究认为美国成人日常活动行为的变化与肥胖之间存在关联,MVPA的增加和SB的减少都与BMI降低有关。研究结果为公共卫生指南提倡增加身体活动时间提供了科学证据,应建议增加或维持成人的MVPA时间并尽量减少久坐时间,从保障睡眠的角度出发,提倡成人从SB和LPA分配时间到MVPA。本研究中实例分析的局限性在于,NHANES是横断面研究,无法洞察因果关系的方向。此外,由于加速度计佩戴缺失时间可能对SB、LPA影响更大,本文将加速度计佩戴缺失时间按SB、LPA和MVPA的比例进行线性调整的方法可能某种程度上会高估MVPA,低估SB和LPA。

5 结语

时间使用已成为大规模公共卫生干预的一个研究热点。本文详细阐述并比较了传统ISM和成分ISM,以促进该方法在时间使用流行病学研究中的应用。传统ISM在分析闭合空间时间数据时的不足难以忽视,而近年来兴起的成分ISM能够确定特定健康结局的最佳时间使用交换方案,可为时间使用和健康结局之间的关系研究提供可靠的证据,成分ISM在身体活动健康促进领域的应用具有十分重要的意义。成分ISM在时间数据研究的使用仍属于新兴领域,诸多模型理论和身体活动健康促进的应用都值得进一步研究。

参考文献:

- BIDDLE G J H, EDWARDSON C L, HENSON J, et al., 2018. Associations of physical behaviours and behavioural reallocations with markers of metabolic health: A compositional data analysis[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 15(10): 2280-2293.
- BOOGAART K G V D, TOLOSANA-DELGADO R, 2013. *Analyzing Compositional Data with R[M]*. Heidelberg: Springer: 73-93.
- BROWN J C, WINTERS-STONE K, LEE A, et al., 2012. Cancer, physical activity, and exercise[J]. *Compr Physiol*, 2(4): 2775-2809.
- CHASTIN S F, PALAREA-ALBALADEJO J, DONTJE M L, et al., 2015. Combined effects of time spent in physical activity, sedentary behaviors and sleep on obesity and cardio-metabolic health markers: A novel compositional data analysis approach[J]. *PLoS One*, 10(10): e0139984-e0140020.
- COLLEY R C, GARRIGUET D, JANSSEN I, et al., 2011. Physical activity of Canadian children and youth: Accelerometer results from the 2007 to 2009 Canadian Health Measures Survey[J]. *Health Rep*, 22(1): 15-23.
- CRUZ B D P, ALFONSO-ROSA R M, MCGREGOR D, et al.,

2020. Sedentary behaviour is associated with depression symptoms: Compositional data analysis from a representative sample of 3233 US adults and older adults assessed with accelerometers[J]. *J Affect Disord*, 265: 59-62.
- DUMUID D, LEWIS L K, OLDS T S, et al., 2018a. Relationships between older adults' use of time and cardio-respiratory fitness, obesity and cardio-metabolic risk: A compositional isotemporal substitution analysis[J]. *Maturitas*, 110: 104-110.
- DUMUID D, OLDS T, LEWIS L K, et al., 2017. Health-related quality of life and lifestyle behavior clusters in school-aged children from 12 countries[J]. *J Pediatr*, 183: 178-183.
- DUMUID D, PEDIŠIĆ Z, STANFORD T E, et al., 2019a. The compositional isotemporal substitution model: A method for estimating changes in a health outcome for reallocation of time between sleep, physical activity and sedentary behaviour[J]. *Stat Methods Med Res*, 28(3): 846-857.
- DUMUID D, STANFORD T E, PEDISIC Z, et al., 2018b. Adiposity and the isotemporal substitution of physical activity, sedentary time and sleep among school-aged children: A compositional data analysis approach[J]. *BMC Public Health*, 18(1): 311-320.
- DUMUID D, WAKE M, CLIFFORD S, et al., 2019b. The association of the body composition of children with 24-hour activity composition[J]. *J Pediatr*, 208: 43-49.
- EGOZCUE J J, PAWLOWSKY-GLAHN V, MATEU-FIGUERAS G, et al., 2003. Isometric logratio transformations for compositional data analysis[J]. *Math Geol*, 35(3): 279-300.
- FILZMOSER P, HRON K, TEMPL M, 2012. Discriminant analysis for compositional data and robust parameter estimation[J]. *Computation Stat*, 27(4): 585-604.
- FRITH E, LOPRINZI P D, 2018. The association between bouts and non-bouts physical activity on retinopathy prevalence[J]. *Eur J Intern Med*, 47: 32-35.
- FUZEKI E, ENGEROFF T, BANZER W, 2017. Health benefits of light-intensity physical activity: A systematic review of accelerometer data of the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES)[J]. *Sports Med*, 47(9): 1769-1793.
- GUTHOLD R, STEVENS G A, RILEY L M, et al., 2018. Worldwide trends in insufficient physical activity from 2001 to 2016: A pooled analysis of 358 population-based surveys with 1.9 million participants[J]. *Lancet Glob Health*, 6(10): e1077-e1086.
- LEPPÄNEN M H, HENRIKSSON P, NYSTRÖM C D, et al., 2017. Longitudinal physical activity, body composition, and physical fitness in preschoolers[J]. *Med Sci Sports Exer*, 49(10): 2078-2085.
- LIU Y, WHEATON A G, CHAPMAN D P, et al., 2016. Prevalence of healthy sleep duration among adults: United States, 2014[J]. *Morb Mortal Wkly Rep*, 65(6): 137-141.
- MADINA S, MEHDI M, HÉLÈNE C, et al., 2015. Descriptive study of sedentary behaviours in 35,444 French working adults: Cross-sectional findings from the ACTI-Cités study[J]. *BMC Public Health*, 15: 379-388.
- MCGREGOR D E, PALAREA-ALBALADEJO J, DALL P M, et al., 2021. Compositional analysis of the association between mortality and 24-hour movement behaviour from NHANES [J]. *Eur J Prev Cardiol*, 28(7): 791-798.
- MEKARY R A, DING E L, 2019. Isotemporal substitution as the gold standard model for physical activity epidemiology: Why it is the most appropriate for activity time research [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 16(5): 797-799.
- MEKARY R A, WILLETT W C, HU F B, et al., 2009. Isotemporal substitution paradigm for physical activity epidemiology and weight change[J]. *Am J Epidemiol*, 170(4): 519-527.
- MICHAEL G, AMY R W, ALLISON G H, et al., 2013. The sleep and technology use of Americans: Findings from the National Sleep Foundation's 2011 Sleep in America Poll[J]. *J Clin Sleep Med*, 9(12): 1291-1299.
- OVIEDO-CARO M Á, BUENO-ANTEQUERA J, MUNGUÍA-IZQUIERDO D, 2020. Associations of 24-hours activity composition with adiposity and cardiorespiratory fitness: The PregnActive project[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 30(2): 295-302.
- PEDIŠIĆ Ž, 2014. Measurement issues and poor adjustments for physical activity and sleep undermine sedentary behaviour research: The focus should shift to the balance between sleep, sedentary behaviour, standing and activity[J]. *Kinesiology*, 46(1): 135-146.
- PEDIŠIĆ Ž, DUMUID D, TIMOTHY S O, 2017. Integrating sleep, sedentary behaviour, and physical activity research in the emerging field of time-use epidemiology: Definitions, concepts, statistical methods, theoretical framework, and future directions[J]. *Kinesiology*, 49(2): 252-269.
- PÉREZ-FOGUET A, GINÉ-GARRIGA R, ORTEGO M I, 2017. Compositional data for global monitoring: The case of drinking water and sanitation[J]. *Sci Total Environ*, 590-591: 554-565.
- POITRAS V J, GRAY C E, BORGHESE M M, et al., 2016. Systematic review of the relationships between objectively measured physical activity and health indicators in school-aged children and youth[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 41(6 Suppl 3): S197-S239.
- PROCHASKA J O, 2008. Multiple health behavior research represents the future of preventive medicine[J]. *Prev Med*, 46(3): 281-285.
- REGINA G, GRETCHEN A S, LEANNE M R, et al., 2020. Global trends in insufficient physical activity among adolescents: A pooled analysis of 298 population-based surveys with 1.6 million participants[J]. *Lancet Child Adolesc Health*, 4(1): 23-35.
- REZENDE L F M, SÁ T H, MIELKE G I, et al., 2016. All-cause mortality attributable to sitting time: Analysis of 54 countries worldwide[J]. *Am J Prev Med*, 51(2): 253-263.
- ROSEN P V, DOHRN I M, HAGSTRÖMER M, 2020. Association between physical activity and all-cause mortality: A 15-year follow-up using a compositional data analysis[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 30(1): 100-107.
- SHANAHAN M J, FLAHERTY B P, 2001. Dynamic patterns of time use in adolescence[J]. *Child Development*, 72(2): 385-401.
- TAYLOR A L, DENNISTON M M, KLEVEN R M, et al., 2016. Association of hepatitis C virus with alcohol use among US adults: NHANES 2003—2010[J]. *Am J Prev Med*, 51(2): 206-215.
- TREMBLAY M S, CARSON V, CHAPUT J P, et al., 2016. Canadian 24-hour movement guidelines for children and youth: An integration of physical activity, sedentary behaviour, and sleep[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 41(6 Suppl 3): S311-S327.
- TREMBLAY M S, ESLIGER D W, TREMBLAY A, et al., 2007. Incidental movement, lifestyle-embedded activity and sleep: New frontiers in physical activity assessment[J]. *Can J Public Health*, 98(Suppl 2): S208-S217.

Operation Mode of Public Sport Service Contract Outsourcing: Competition, Negotiation and Institution Outsourcing

LI Yanling¹, NIU Ruixin¹, ZHANG Xin'ao¹, LIU Chang², QIU Peng³

1. Physical Education College of Soochow University, Suzhou 215021, China; 2. Zhengzhou Business Technicians Institute, Zhengzhou 450100, China; 3. Changzhou Beijiao Senior High School, Changzhou 213032, China

Abstract: Outsourcing of public sport service contracts is an innovative choice to expand the supply of public sport service, deepen the reform of sport undertakings and change the government functions. Based on systematically grasping the law of outsourcing operation of public sports service contracts in China, this paper analyzes the characteristics, applicable conditions, effects and shortcomings of contract outsourcing modes, such as competition mode, negotiation mode and outsourcing mode within the system, by using the methods of literature and case analysis. The results show that the practical problems existing in the practice of public sports service contract outsourcing in China are the main reasons why the competition mode is difficult to popularize and the operation of negotiation mode and outsourcing mode within the system is limited. Therefore, it is necessary to promulgate laws and policies related to public sports service contract outsourcing as soon as possible, improve the construction of relevant policies and regulations system, attach importance to cultivating the public sports service supplier market, establish a fair and reasonable bidding mechanism, improve the supervision mechanism of public sports service contract outsourcing, and strengthen the construction of performance evaluation system of public sports service contract outsourcing, in order to further optimize the public sports service contract outsourcing behavior.

Keywords: public sport service; contract outsourcing; operation mode; governmental functions

(上接第 58 页)

WILLETT W C, HOWE G R, KUSHI L H, 1997. Adjustment for total energy intake in epidemiologic studies[J]. *Am J Clin Nutr*, 65 (Suppl 4): 1220S-1228S.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2021. World health statistics 2021: Monitoring health for the SDGs, sus-

tainable development goals. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

YIN J, JIN X, SHAN Z, et al., 2017. Relationship of sleep duration with all-cause mortality and cardiovascular events: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies [J]. *J Am Heart Assoc*, 6(9): 2047-9980.

Comparison and Empirical Study of the Application of Compositional Isotemporal Substitution Model and Non-compositional Isotemporal Substitution Model in the Research Field of Health Effects of Physical Activity

HUANG Baoying^{1,2}, TAN Jianyi², LIU Qing², ZHANG Dongmei², XU Huaifu², HUANG Zhenhui², CHENG Jinqun², REN Zhiqiang², DENG Kaisheng², LI Hongjuan³, GAO Yanhui^{2,4*}

1. Zengcheng Branch, Nanfang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 511300, China; 2. School of Public Health, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510315, China; 3. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 4. School of Basic Medicine and Public Health, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract: Physical activity and health promotion is an important research field of public health and sports science. So far, some studies have explored the association between physical activity, sedentary behavior, sleep and various health outcomes separately. However, different behaviors in 24 hours are inherently co-dependent. In recent years, some scholars proposed an isotemporal alternative strategy to find the best time allocation method for achieving the maximum health benefits through the reallocation of time-use components. This study reviewed the development of current isotemporal substitution model in the research field of physical activity, and elaborated the theory of traditional isotemporal substitution model (i.e., non-compositional) and the compositional isotemporal substitution model as well as analyzed by examples. Based on the findings of this study, it is hope to provide new ideas and methods for sports science and public health researchers, and promote the application of isotemporal substitution model in the field of physical activity and health promotion.

Keywords: physical activity; isotemporal substitution model; compositional data analysis